

Power Loss Reduction and Enhancing Voltage Profile of Distribution Network Feeders: A Case Study in Iran

Mohammad Najafi¹, M.Sc Student, Mohammad Reza Miveh¹, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

Abstract:

Considering the significant role of electrical energy in economic and social development, as well as the substantial investments in the power industry, particularly in distribution networks, practical strategies to reduce losses and enhance the efficiency of existing facilities are essential. This paper investigates and compares the impact of all available methods on loss reduction and voltage profile improvement from both technical and economic perspectives on a real network. Additionally, to achieve more accurate results, the uncertainties in distributed generation resources and network loads are accounted for using scenario generation methods. The study evaluates all possible methods to determine the optimal location and capacity of equipment as the problem-solving algorithm. Load forecasting is incorporated to assess the effectiveness of the proposed methods for future years. Furthermore, a novel idea of reactive power injection by a solar power plant is considered and compared with the case of a solar power plant without reactive power injection. The proposed methods are simulated on five real high-loss distribution feeders in Iran using DIgSILENT software and Python programming. The simulation results indicate that the optimal placement of a solar power plant with reactive power injection provides the best technical performance, while capacitor placement offers the highest economic efficiency.

Keywords: Power loss, Voltage profile, Economic evaluation, Distributed generation

Received: 25 July 2024

Revised: 14 December 2024

Accepted: 17 January 2025

Corresponding Author: Dr. Mohammadreza Miveh, miveh@tafreshu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1127202>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ در فیدرهای شبکه توزیع: مطالعه موردی در ایران

محمد نجفی^۱، دانشجوی کارشناسی/ارشد، محمدرضا میوه^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

چکیده: با توجه به نقش مهم انرژی الکتریکی در رشد و توسعه اقتصادی و اجتماعی و صرف هزینه‌های سنگین برای سرمایه‌گذاری در صنعت برق به ویژه شبکه‌های توزیع، وجود راهکارهای عملی کاهش تلفات در جهت افزایش بهره‌وری امکانات موجود کاملاً ضروری می‌باشد. این مقاله، تاثیر تمامی روش‌های موجود بر کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ از نقطه نظر فنی و اقتصادی به طور همزمان در یک شبکه واقعی را مورد بررسی و مقایسه قرار داده است. همچنین به منظور دست یابی به جواب‌های دقیق‌تر، اثر عدم قطعیت‌های موجود در منابع تولید پراکنده و بارهای شبکه با استفاده از روش تولید سناریو نیز در نظر گرفته شده است. بررسی تمام روش‌های ممکن به منظور یافتن ظرفیت و مکان بهینه تجهیزات به عنوان الگوریتم حل مسئله در نظر گرفته شده است. پیش بینی بار برای بررسی کارایی روش‌های ارائه شده برای سال‌های آتی در نظر گرفته شده است. همچنین ایده‌ای مبنی بر تزریق توان راکتیو توسط نیروگاه خورشیدی در نظر گرفته شده است و با حالت نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو مقایسه شده است. روش‌های پیشنهادی بر روی پنج فیدر واقعی شبکه توزیع ایران با تلفات توان بالا با استفاده از نرم افزار دیگسایلنت و زبان برنامه نویسی پایتون شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که جایابی بهینه نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو از لحاظ فنی، بهترین کارایی و خازن گذاری از لحاظ اقتصادی بیشترین بازدهی را دارا می‌باشد.

واژه های کلیدی: تلفات توان، پروفیل ولتاژ، ارزیابی اقتصادی، منابع تولید پراکنده

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا میوه، miveh@tafreshu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1127202>





۱- مقدمه

با رشد و گسترش تکنولوژی در حوزه صنعت برق، نیاز به بررسی و شناخت و تحلیل تاثیر تکنولوژی بر روی شبکه قدرت بیشتر از گذشته حس می شود. با توجه به مشکلات زیاد ناشی از تلفات توان و افت ولتاژ در شبکه توزیع نیاز به بررسی روش‌های متنوع که کمک به بهبود وضعیت موجود کند، ضروری می‌باشد. علاوه بر بررسی روش‌های موجود برای بهبود شرایط فنی، در کنار آن باید به بررسی شرایط اقتصادی موجود نیز پرداخته شود. توجه به بحث اقتصادی یکی از مهمترین مقوله‌های انجام پروژه می‌باشد که امروزه بسیار مورد توجه واقع شده است. به علت وجود تلفات انرژی سالانه زیاد در شبکه توزیع و کیفیت پایین ولتاژ، نیاز به بررسی و مطالعه روش‌های مختلف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه‌های توزیع می‌باشد. همچنین ارزیابی اقتصادی روش‌های به کار گرفته شده، در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و منابع تولید پراکنده موجب افزایش کارایی روش‌های پیشنهادی و دقیق تر شدن حل مسئله می‌گردد.

تاکنون روش‌های بسیاری در مراجع به منظور کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ پیشنهاد شده است. مرجع [۱] به بازآرایی و اختصاص ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات شبکه پرداخته است. قیود مسئله شامل مشخص بودن حد ولتاژ و کاهش نا متعادلی در شبکه و به صفر رسیدن جریان نول جاری شده می‌باشد. در این مقاله بار به صورت ثابت مدل شده و برای سه منبع تولید پراکنده عدم قطعیت در نظر گرفته شده است و نتایج تحت سناریوهای انجام باز آرایی به منظور استفاده بهینه از ظرفیت منابع تولید پراکنده، بدست آمده است. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۳۳ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. مرجع [۲] به جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به منظور کاهش انرژی و بهبود نامتعادلی ولتاژ پرداخته است. قیود مسئله در این مطالعه شامل حفظ ولتاژ به طوری که ولتاژ از حد مشخصی بیشتر یا کمتر نشود، حفظ حالت شعاعی شبکه، حفظ نا متعادلی ولتاژ و همچنین کمترین تعداد سوئیچ زنی برای تغییر آرایش شبکه می‌باشد. مرجع [۳] به کاهش تلفات پرداخته است در حالی که قیود مسئله در این مطالعه، حفظ محدوده ولتاژ، حفظ شعاعی بودن شبکه، حفظ پایداری ولتاژ و به حداقل رسیدن تعداد باز و بست سوئیچ ها می‌باشد. در حل این مسئله منابع تولید پراکنده در چند باس خاص قرار و مدل بار به صورت استاتیکی در نظر گرفته شده است. همچنین بحث احتمال و عدم قطعیت برای بار و منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. مرجع [۴] به جایابی و تخصیص ظرفیت منابع تولید پراکنده به منظور کاهش تلفات شبکه پرداخته است. قیود مسئله حفظ محدوده مشخصی از ولتاژ، حفظ حالت شعاعی شبکه و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری و غیر بهره‌برداری و آلودگی ناشی از عدم حضور منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. در حل این مسئله مدل بار را به صورت بار فصلی در نظر گرفته‌اند و برای منابع تولید پراکنده هم منحنی تولید در نظر گرفته شده است. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۳۳ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد و نتایج الگوریتم دیگر مقایسه شده که جواب بهتر گرفته شده است. مرجع [۵] به کاهش تلفات شبکه پرداخته است که قید مسئله حفظ محدوده مشخصی از ولتاژ می‌باشد. روش حل مسئله استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات کوانتومی تطبیقی می‌باشد. در حل این مسئله مدل بار را دینامیکی و ۲۴ ساعته در نظر گرفته‌اند و همچنین سعی بر این شده که در صورت پیشامد برای باس و خطوط در شبکه برق رسانی همچنان ادامه داشته باشد. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۳۳ و ۱۱۸ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. مرجع [۶] به کاهش قطعی برق با کمک منابع تولید پراکنده پرداخته است. قید این مسئله بیشتر نبودن دیماند درخواستی از ظرفیت منابع تولید پراکنده می‌باشد. در حل این مسئله مدل بار به صورت ثابت بوده و پنج منبع تولید پراکنده در شبکه قرار داده شده و هدف جزیره‌ای کار کردن این منابع می‌باشد. مرجع [۷] به کاهش محدودیت‌های منابع تولید پراکنده پرداخته است. قیود مسئله در این مطالعه، محدودیت استفاده از تعداد کلیدها در شبکه و محدودیت نوع کارکرد کلیدها می‌باشد. همچنین شبکه دارای نیروگاه خورشیدی و نیروگاه بادی با منحنی ۲۴ ساعته توان تولیدی می‌باشد و عدم قطعیت برای بار و منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. مرجع [۸] به بازآرایی و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و ادوات قدرت به منظور ذخیره‌سازی بهینه انرژی پرداخته است. قیود مسئله شامل مشخص بودن حد ولتاژ، کاهش تلفات، نزدیک شدن ضریب بار به عدد یک و همچنین کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. روش حل مسئله استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی MOSEK می‌باشد. در این مطالعه مدل بار دینامیکی و ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده و از نیروگاه فتوولتائیک و بادی و مبدل‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است که در زمان های مشخص انرژی ذخیره شده به شبکه تحویل داده شود تا بهترین عملکرد را شبکه داشته باشد. این مطالعه در ۴ سناریو مختلف بررسی شده است. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۳۳ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. مرجع [۹] به بازآرایی شبکه به منظور کاهش انرژی تلفاتی سالیانه پرداخته است. قیود مسئله مشخص بودن حد ولتاژ، کاهش هزینه بهره‌برداری منابع تولید پراکنده و افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد. روش حل



مسئله استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری و ترکیبی ازدحام ذرات و گرگ خاکستری بهبود یافته می‌باشد. در این مطالعه، منابع تولید پراکنده به صورت توان ثابت مدل شده اند و بارها هم به صورت دینامیکی تغییر کرده و مقادیر آن‌ها در ۸ بازه زمانی داده شده است. مرجع [۱۰] به بازآرایی شبکه به منظور بهبود پروفیل ولتاژ پرداخته است. قیود مسئله شامل مشخص بودن حد ولتاژ، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد. روش حل این مسئله استفاده از پخش بار معمولی می‌باشد. در این مطالعه مدل بار به صورت ثابت در نظر گرفته شده است و از ادوات فکتس و منابع تولید پراکنده استفاده شده است. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۳۳ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. مرجع [۱۱] به بازآرایی دینامیکی به منظور کاهش انرژی تلفاتی سالیانه پرداخته است. قیود مسئله شامل مشخص بودن حد ولتاژ، حد مجاز توان عبوری از شاخه‌ها، حفظ حالت شعاعی شبکه، به حداقل رساندن تعداد کلیدزنی برای تغییر آرایش شبکه و بهبود قابلیت اطمینان می‌باشد. روش حل مسئله استفاده از تقریب لاگرانژ می‌باشد. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۱۵ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. همچنین مرجع [۱۲] به بازآرایی و جابجایی بهینه منابع تولید پراکنده و جابه‌جایی فازهای مصرف‌کننده به منظور کاهش تلفات شبکه پرداخته است. قیود مسئله شامل مشخص بودن حد ولتاژ، کاهش نا متعادلی در شبکه و به صفر رسیدن جریان نول جاری شده می‌باشد. در این مطالعه بار به صورت ثابت مدل شده و پس از شبیه‌سازی‌های مختلف محقق به این نتیجه رسیده که بازآرایی و جا به جایی فازها هزینه خیلی کمتری نسبت به اختصاص منابع تولید پراکنده دارد. شبکه مورد مطالعه، شبکه ۱۲۳ باس بار استاندارد IEEE می‌باشد. در مرجع [۱۳]، برای کاهش تلفات توان و بهبود پروفایل ولتاژ، از بهینه‌سازی مکان خازن‌ها و تولید پراکنده در سیستم توزیع استفاده شده است. با به‌کارگیری الگوریتم‌های تحلیل جریان بار و الگوریتم ژنتیک، مکان و اندازه بهینه تجهیزات در یک سیستم تست IEEE 33-Bus و یک شبکه واقعی در نپال تعیین شده و نتایج نشان‌دهنده کاهش تلفات توان و بهبود پروفایل ولتاژ است. مرجع [۱۴]، برای اطمینان از تأمین ولتاژ پایدار به مصرف‌کنندگان از خازن‌ها به‌منظور جبران توان و بهبود ضریب توان در سیستم‌های توزیع استفاده کرده است. در این مطالعه نشان داده است که نصب بهینه خازن‌ها و استفاده از تکنیک‌های مدرن بهینه‌سازی به کاهش نوسانات ولتاژ و تلفات توان کمک می‌کند و موجب بهبود پروفایل ولتاژ، افزایش پایداری و قابلیت اطمینان سیستم توزیع می‌شود. در مرجع [۱۵]، الگوریتم بهینه‌سازی COOT برای یافتن مکان بهینه و توان تولیدی تولیدپراکنده با هدف کاهش تلفات توان و بهبود شاخص تعادل بار فیدر در شبکه توزیع بررسی شده است. مقایسه با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز نشان می‌دهد که COOT عملکرد بهتری در کاهش تلفات و بهبود تعادل بار دارد. در مرجع [۱۶]، برای بهبود پایداری ولتاژ و کاهش تلفات توان، تخصیص بهینه تولیدپراکنده مانند سیستم‌های خورشیدی و بادی پیشنهاد شده است. این مطالعه به مزایای اقتصادی و فنی تولید پراکنده و روش‌های بهینه‌سازی برای اندازه و مکان‌یابی منابع تولیدپراکنده جهت بهبود پروفایل ولتاژ پرداخته و نشان داده است که با استفاده از الگوریتم‌های متاهوریستیک، می‌توان تلفات را به حداقل و ثبات ولتاژ را به حداکثر رساند. در مرجع [۱۷]، یک الگوریتم جستجوی اصلاح‌شده چتر دریایی برای بهینه‌سازی تنظیم مجدد شبکه در فیدرهای توزیع ولتاژ متوسط ارائه شده است. این الگوریتم برای تقویت قابلیت اطمینان سیستم و کاهش تلفات توان با استفاده از مدل چندهدفه طراحی شده است که شامل معیارهایی همچون انرژی تأمین‌نشده، میانگین عدم دسترسی سیستم و فرکانس قطعی‌ها می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکه ۱۳۷ باس نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر، بهبود قابل توجهی در کاهش تلفات توان و افزایش قابلیت اطمینان سیستم به دست می‌آورد. در مرجع [۱۸]، یک روش مؤثر برای تنظیم مجدد فیدر و تخصیص خازن جهت بهینه‌سازی کاهش تلفات توان و بهبود پروفایل ولتاژ در سیستم توزیع برق شهری در هند ارائه شده است. این روش با استفاده از جستجوی پی‌درپی، مکان و اندازه بهینه خازن‌ها را مشخص کرده و تلفات ناشی از جریان را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد، کاهش چشمگیری در تلفات توان سیستم ایجاد می‌کند و با افزودن سوئیچ‌های بیشتر، عملکرد بهینه‌سازی می‌تواند بهبود یابد. در مرجع [۱۹]، یک روش بهینه برای پیکربندی شبکه در سیستم توزیع برق جهت کاهش تلفات توان و بهبود پروفایل ولتاژ ارائه شده است. با استفاده از یک الگوریتم اصلاح‌شده بهینه‌سازی ذرات انتخابی، این مطالعه تلفات توان واقعی را به حداقل و پروفیل ولتاژ را تقویت می‌کند. آزمایش‌ها روی سیستم IEEE 33-Bus نشان می‌دهند که این روش به بهبود قابل توجه سطح ولتاژ و کاهش انحراف ولتاژ و تلفات توان نسبت به روش‌های دیگر منجر می‌شود. جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در این زمینه را نشان می‌دهد.



جدول (۱): خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

مراجع	تابع هدف		تولید پراکنده		عدم قطعیت		هدف مقاله		
	تک هدفه	چند هدفه	حضور	اندازه بهینه	جایابی بهینه	بار	تولید پراکنده	کاهش تلفات	پروفیل ولتاژ
[۱]			✓	✓	✓			✓	✓
[۲]	✓		✓		✓			✓	✓
[۳]	✓		✓			✓	✓	✓	
[۴]	✓		✓	✓	✓			✓	✓
[۵]	✓							✓	✓
[۵]	✓		✓						✓
[۷]	✓		✓					✓	✓
[۸]	✓		✓	✓	✓				
[۹]		✓	✓					✓	
[۱۰]	✓								✓
[۱۱]	✓							✓	
[۱۲]	✓		✓	✓	✓			✓	
[۱۳]	✓		✓	✓	✓			✓	✓
[۱۴]	✓							✓	✓
[۱۵]	✓		✓		✓		✓	✓	
[۱۶]	✓		✓	✓				✓	✓
[۱۷]		✓						✓	
[۱۸]	✓							✓	✓
[۱۹]	✓							✓	✓
روش پیشنهادی	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

با توجه به جدول (۱) می‌توان دریافت که چالش بسیار مهمی که در مقالات گذشته نادیده گرفته شده است، ارزیابی هزینه اقتصادی طرح‌های اجرایی برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ است که هیچ یک از مقالات این امر مهم را در نظر نگرفته‌اند. در واقع مهم‌ترین نتیجه کاهش تلفات، ارزش افزوده اقتصادی آن است و اگر هزینه‌های اجرای طرح بالاتر از سود حاصل از کاهش تلفات باشد، آن طرح نباید اجرا شود که این امر در تحقیقات گذشته مغفول مانده است. نکته دیگری که می‌توان در مقالات گذشته مورد نقد قرار داد، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در اکثر مقالات است. با توجه به این که به طور قطعی مشخص نیست که این الگوریتم‌ها جواب بهینه مطلق را می‌دهند استفاده از آنها ممکن است به جواب بهینه منجر نشود. همچنین طرح‌های ارائه شده فقط برای بازه زمانی خاص طراحی شده است و پیش بینی برای آینده در آن انجام نشده است. همچنین شبکه‌های مورد مطالعه در اکثر مقالات شبکه‌های تست IEEE بوده و مطالعه بر روی یک فیدر واقعی انجام نشده است.

به منظور حل مشکلات مطرح شده در بالا، در این مقاله علاوه بر به کارگیری روش‌های کاهش تلفات انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ، ارزیابی اقتصادی با به کارگیری روش‌های مختلف انجام شده است. این روش‌ها شامل تغییر سطح مقطع کابل، خازن‌گذاری، استفاده از ادوات FACTS و جایابی نیروگاه‌های خورشیدی با و بدون تزریق توان راکتیو است. همچنین مطالعات انجام شده در مقالات پیشین بر روی شبکه‌های تست بوده ولی در این مقاله مطالعات روی شبکه واقعی انجام شده است. در مقالات مورد بررسی اکثراً تلفات توان را مورد بررسی قرار داده شده است. اما در این مطالعه با توجه به منحنی بار روزانه، تلفات انرژی سالانه بیان شده است. همچنین پیش بینی بار در این مقاله به طور دقیق و واقعی انجام شده تا مشخص شود که آیا طرح‌های پیشنهادی در سال‌های آتی هم پاسخ‌گوی شبکه خواهد بود. در این مقاله، تاثیر تمامی روش‌های موجود بر کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ از نقطه نظر فنی و اقتصادی به طور همزمان در یک شبکه واقعی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همچنین اثر عدم قطعیت‌های موجود در منابع تولید پراکنده و بارهای شبکه با استفاده از روش تولید سناریو لحاظ شده است. علاوه بر این، تزریق توان راکتیو توسط نیروگاه خورشیدی پیاده سازی



شده و با حالت نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو مقایسه شده است. روش‌های پیشنهادی بر روی پنج فیدر واقعی شبکه توزیع ایران با تلفات توان بالا شبیه سازی شده است. به طور کلی نوآوری‌های این مقاله شامل موارد زیر می باشد:

- بر خلاف مقالات گذشته که از روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله استفاده کرده اند، در این مقاله بررسی تمام روش‌های ممکن به منظور یافتن ظرفیت و مکان بهینه تجهیزات به عنوان الگوریتم حل مسئله در نظر گرفته شده است.
- ارزیابی اقتصادی واقعی از به کارگیری روش‌های مختلف کاهش تلفات انرژی برای تعیین بازدهی اقتصادی آن‌ها و مقایسه با حالت بدون اعمال روش‌های کاهش تلفات در این مقاله در نظر گرفته شده است.
- به منظور دست یابی به پاسخ‌های دقیق تر عدم قطعیت‌های موجود در بار و تولیدپراکنده در این مقاله در نظر گرفته شده است.
- در این مقاله به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی از شبکه توزیع واقعی برق در ایران استفاده شده است.
- در این مقاله بررسی تلفات انرژی سالانه با توجه به منحنی بار روزانه، برخلاف مقالات پیشین که عموماً بر تلفات توان متمرکز بوده‌اند صورت گرفته است.
- در این مقاله پیش‌بینی بار برای ارزیابی عملکرد طرح‌های پیشنهادی در سال‌های آتی و بررسی پایداری کارایی آن‌ها در شبکه توزیع واقعی صورت گرفته است.
- استفاده از نیروگاههای خورشیدی با مقیاس کوچک به هدف تزریق توان راکتیو در شبکه توزیع واقعی و ارزیابی اقتصادی آن.

در ادامه به بخش‌های دیگر این مقاله پرداخته شده است. بخش دوم مقاله به روش و مدلسازی مسئله پرداخته شده است. این بخش شامل الگوریتم پیشنهادی، روش‌های حل مسئله و ارزیابی اقتصادی می‌باشد. در بخش سوم به معرفی شبکه مورد مطالعه پرداخته شده است. بخش چهارم از این مقاله شامل شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج و همچنین بخش پنجم نتیجه‌گیری کلی می‌باشد.

۲- روش و مدلسازی مسئله

۲-۱- الگوریتم ارائه شده برای جایابی بهینه

الگوریتمی که برای جایابی بهینه و سائز بهینه منابع تولید پراکنده و ادوات فکتس در نظر گرفته شده است، بررسی تمام حالت‌های ممکن می‌باشد. برای این که تعداد حالت‌های موجود کاهش یابد، تعداد گزینه‌های موجود برای نصب این منابع را با در نظر گرفتن مواردی همچون "محل نصب منابع جایی باید باشد که امنیت تجهیزات و وسایل تضمین شده باشد" و همچنین "محل قرار گیری منابع نزدیک به مرکز ثقل بارهای موجود در فیدر باشد" نیز کاهش داده شده است. در این مقاله این موارد در فیدر مورد مطالعه مورد توجه قرار گرفته شده است. با توجه به نکات گفته شده، برنامه نوشته شده به زبان Python از بین گزینه‌های پیشنهادی تمام حالت‌های ممکن را بررسی کرده (برای نیروگاه خورشیدی و ادوات فکتس) و در هر مرحله مقدار معادله (۱) و (۴) را در پیک بار به دست آورده و مرتب سازی می‌کند و بهترین گزینه برای نصب منابع معرفی می‌شود.

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\text{branch}}} 3 \times R_i \times |I|^2 \right\} \quad (1)$$

جدول (۲): واژه نامه

نماد	توضیح
$V_{i,\min}, V_{i,\max}$	حداکثر و حداقل ولتاژ باسبار ها
$\text{Loading}_i^{\text{Critical}}$	حداکثر بار قابل تحمل خطوط
P	ارزش فعلی سرمایه
F	ارزش آتی سرمایه
ROR	نرخ بازگشت سرمایه
MARR	حداقل نرخ جذب کننده بازگشت
y_i	مقدار i ام نمونه آماری
π_{param}	شماره پارامتر در مدل
π_{points}	شماره نمونه آماری
$\bar{y}$	میانگین ورودی آماری





معادله (۲) و (۳) قیود مربوط به حد ولتاژ و حداکثر توان عبوری را نشان می‌دهد.

$$V_i^{min} \leq V_i^j \ll V_i^{max} \quad (2)$$

$$loading_i^j \ll loading_i^{critical} \quad (3)$$

حد مجاز برای ولتاژ بین ۰.۹۵ و ۱.۰۵ انتخاب می‌شود.

$loading_i^{critical}$ بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد انتخاب می‌شود.

متغیرهای تصمیم مسئله، مکان نصب، ظرفیت منابع تولید پراکنده و ادوات فکس می‌باشد. بعد از اجرا شدن برنامه، پنج پیشنهادات برای جابجایی، با استفاده از سناریوسازی عدم قطعیت نیز بررسی شده است که در شرایط عدم قطعیت کدام یک از سناریوها بهتر عمل می‌کند. عدم قطعیت برای بار با استفاده توزیع نرمال و برای نیروگاه خورشیدی عدم قطعیت با استفاده از تابع بتا در نظر گرفته شده است. سپس بهترین گزینه در شرایط وجود عدم قطعیت انتخاب شده است. قیدی که مانع از افزایش این منابع در شبکه می‌شود، تلفات توان می‌باشد. یعنی جابجایی و ظرفیت بهینه تجهیزات تا جایی ادامه می‌یابد که باعث کاهش تلفات توان شود. در غیر این صورت ادامه الگوریتم برای جابجایی و پیدا کردن ظرفیت بهینه بی نتیجه می‌باشد. سپس بر روی بهترین سناریوهای انتخاب شده ارزیابی اقتصادی انجام می‌شود تا مشخص شود کدام یک از روش‌ها بازدهی بیشتری دارند.

۲-۲- روش خازن گذاری

حل مسئله خازن گذاری بهینه در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم جست و جوی ممنوعه^۱ در نرم افزار DigSILENT نوشته شده است. در ادامه به روند حل مسئله توسط این الگوریتم پرداخته شده است.

برای مسئله جابجایی خازن باید یک مسئله بهینه با استفاده از روش راهبردی برای حل مساله TS فرمول بندی کرد. در مساله جابجایی خازن با این روش مکان، نوع، تعداد و اندازه خازن های نصب شونده در سیستم توزیع شعاعی و همچنین واحدهای کنترل خازن در سطوح مختلف بار، تعیین می‌شوند. اندازه خازن‌ها و واحدهای کنترل همچون یک متغیر تصمیم‌گیری گسسته رفتار می‌کنند و مساله جابجایی خازن همچون یک مساله بهینه سازی ترکیبی با تابع هدف غیر مشتق پذیر فرمول بندی می‌شود. پریود سالیانه بار هزینه مرتبط با تلفات انرژی، بیان می‌شود. تابع هدف سیستم حداقل کردن هزینه خرید خازن و هزینه تلفات سیستم می‌باشد [۲۰]. متغیرهای تصمیم مسئله قرارگیری خازن‌ها و همچنین انتخاب ظرفیت خازن، از روی ظرفیت داده شده می‌باشد. البته باید توجه داشت ممکن است در مسئله یک سری خازن وجود داشته باشد و با استفاده از خازن های موجود بهینه سازی انجام شود که در این صورت بهینه کردن هزینه خرید خازن از تابع هدف حذف می‌شود. سپس خازن گذاری بهینه در نرم افزار DigSILENT انجام می‌شود.

۲-۳- روش تغییر سطح مقطع کابل

در حل مسئله تغییر سطح مقطع کابل، ابتدا کابل‌هایی که در آن‌ها بیشترین افت ولتاژ و تلفات وجود دارد، شناسایی می‌شود و سپس کابل‌هایی با سطح مقطع بیشتر جایگزین شده و تلفات و افت ولتاژ در شبکه چک می‌شود تا به کمترین مقدار خود برسد [۲۰]. دو محدودیت "افت ولتاژ در طول خط تغذیه که معمولاً بین ۰.۹۵ و ۱.۰۵" و همچنین "بارگذاری محدود برای خطوط شبکه" برای بهینه سازی در نظر گرفته شده است. در محدودیت دوم، معمولاً $loading_i^{critical}$ بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد انتخاب می‌شود. متغیرهای تصمیم این مسئله کابل‌های قابل جایگزینی برای تغییر سطح مقطع می‌باشد. در تابع هدف فرض بر این است که کابل‌های انتخاب و جایگزین شده هیچ تاثیری بر روی سایر تجهیزات (مانند مقاومت پایه برق و مقره و سایر یراق آلات) نداشته باشند. سپس تغییر سطح مقطع بهینه در نرم افزار DigSILENT انجام شده است.



۲-۴- برآورد اقتصادی

در این مقاله از برآوردهای اقتصادی همچون ارزش فعلی و ارزش آتی سرمایه استفاده شده است. در ادامه به روابط تحلیل اقتصادی استفاده شده پرداخته شده است.

ارزش فعلی و ارزش آتی سرمایه

از آنجایی که هزینه‌های یک پروژه در طی سال‌های مختلف انجام می‌شود و درآمدهای آن نیز در طی سال‌های مختلف محقق می‌شود، اختلاف زمانی بین هزینه‌ها و درآمدها به وجود می‌آید و این اختلاف زمانی باعث می‌شود که ارزش واقعی هزینه انجام شده (یا درآمد به دست آمده) در دو سال مختلف با هم اختلاف داشته باشد. فرض شود در حال حاضر مبلغ P (که از این پس ارزش فعلی^۲ نامیده می‌شود) در دسترس می‌باشد. ارزش این پول بعد از N سال با نرخ بهره i درصد از رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$F = P \times \left(1 + \frac{i}{100}\right)^N \quad (4)$$

براساس رابطه (۵)، ارزش پول در آینده به ارزش پول در حال حاضر تبدیل می‌شود.

$$P = F \times \frac{1}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^N} \quad (5)$$

که F ارزش آتی^۳ سرمایه مورد نظر می‌باشد. در رابطه (۴) فرض بر این است که اولاً بهره در پایان هر سال محاسبه می‌شود، ثانیاً مبالغ بهره، به همراه اصل پول مجدداً برای سال بعد سرمایه‌گذاری می‌گردد و ثالثاً نرخ بهره در طول N سال ثابت و برابر با مقدار i می‌باشد. در این مقاله نرخ بازگشت سرمایه^۴، یا به اختصار ROR و حداقل نرخ جذب کننده بازگشت^۵ یا به اختصار MARR و همچنین روش ارزش فعلی به منظور ارزیابی اقتصادی طرح‌ها استفاده شده است.

بررسی هزینه در اجرای طرح‌های این مقاله

در این بخش از مقاله به بررسی مسائل مربوط به هزینه‌های موجود برای راه‌اندازی و سود حاصل از اجرای طرح‌های ارائه شده پرداخته شده است. نکته حائز اهمیت این است که به دید کلی به هزینه‌ها نگاه شده و از بعضی هزینه‌های جانبی کوچک که در ارزیابی طرح تأثیر زیادی ندارند، صرف نظر شده است.

الف- نیروگاه خورشیدی

انجام این طرح می‌تواند توسط خود شرکت توزیع یا از طریق مشارکت سرمایه‌گذار برای احداث نیروگاه انجام شود. در نیروگاه خورشیدی هزینه اولیه صرف خرید تجهیزات مانند پنل خورشیدی و اینورتر می‌باشد. در طول سال هم هزینه‌های تعمیر و نگهداری از نیروگاه خورشیدی وجود دارد. درآمد حاصل از فروش برق هم نیروگاه خورشیدی باشد. پس هزینه ثابت و سرمایه اولیه صرف خرید تجهیزات و نصب نیروگاه می‌شود و هزینه سالیانه شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه سود فروش برق می‌شود.

$$\text{خرید و نصب تجهیزات} = \text{هزینه اولیه} \quad (6)$$

$$\text{هزینه تعمیر و نگهداری} - \text{فروش انرژی} = \text{هزینه سالیانه} \quad (7)$$

و جریان نقدی شرکت توزیع از این طرح با توجه به رابطه (۶) و (۷) می‌باشد.

$$0 = \text{هزینه اولیه} \quad (8)$$



$$(9) \quad \text{قیمت بهبود پروفیل ولتاژ} + \text{قیمت کاهش انرژی تلف شده} = \text{درآمد سالیانه}$$

حال اگر این سرمایه گذاری از طرف خود شرکت توزیع بخواهد انجام شود هزینه اولیه و هزینه سالیانه براساس روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می شود.

$$(10) \quad \text{خرید و نصب تجهیزات} = \text{هزینه اولیه}$$

$$(11) \quad \text{قیمت بهبود پروفیل ولتاژ} + \text{قیمت کاهش انرژی تلف شده} + \text{فروش انرژی} = \text{درآمد سالیانه} \\ \text{هزینه تعمیر و نگهداری} -$$

ب - D-Statcom

این طرح که می تواند از جانب شرکت توزیع انجام شود، با خرید تجهیز مورد نظر همراه است. و سود حاصل از کاهش انرژی تلف شده و بهبود پروفیل ولتاژ موجب درآمد سالیانه می شود. هزینه تعمیر و نگهداری را هم باید در نظر گرفت. هزینه اولیه و درآمد سالیانه این طرح براساس روابط (۱۲) و (۱۳) حاصل می شود.

$$(12) \quad \text{خرید و نصب تجهیزات} = \text{هزینه اولیه}$$

$$(13) \quad \text{هزینه تعمیر و نگهداری} - \text{هزینه بهبود پروفیل ولتاژ} + \text{هزینه کاهش انرژی تلف شده} = \text{درآمد سالیانه}$$

پ - خازن گذاری

این طرح از جانب شرکت توزیع انجام شود که با خرید تجهیز مورد نظر همراه است. و ارزش حاصل از کاهش انرژی تلف شده و بهبود پروفیل ولتاژ درآمد سالیانه منهای هزینه تعمیر و نگهداری معادل سود سالیانه می شود. هزینه اولیه و درآمد سالیانه این طرح براساس روابط (۱۴) و (۱۵) حاصل می شود.

$$(14) \quad \text{خرید و نصب تجهیزات} = \text{هزینه اولیه}$$

$$(15) \quad \text{هزینه تعمیر و نگهداری} - \text{هزینه بهبود پروفیل ولتاژ} + \text{هزینه کاهش انرژی تلف شده} = \text{درآمد سالیانه}$$

ت - تغییر سطح مقطع

این طرح توسط شرکت توزیع انجام می شود که اغلب موارد، در موارد افزایش بارگذاری خط این کار انجام می شود و اهداف اقتصادی تغییر سطح مقطع مورد توجه قرار نمی گیرد. تنها تفاوت این طرح با طرح های خازن گذاری و D-Statcom عدم نیاز به هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه می باشد. هزینه اولیه و درآمد سالیانه این طرح براساس روابط (۱۶) و (۱۷) حاصل می شود.

$$(16) \quad \text{خرید و نصب تجهیزات} = \text{هزینه اولیه}$$

$$(17) \quad \text{هزینه بهبود پروفیل ولتاژ} + \text{هزینه کاهش انرژی تلف شده} = \text{درآمد سالیانه}$$

۳- شبکه مورد مطالعه

شبکه فشار متوسط مورد مطالعه دارای ۱۱ پست ۶۳/۲۰ کیلو ولت و ۳۶۶۸ پست ۲۰/۰.۴ کیلو ولت می باشد. خروجی پست فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلو ولت است و این خروجی ها توسط خط فشار متوسط به سمت مصرف کننده ها کشیده می شود و انرژی برق از آن جا توسط ترانسفورماتور ۲۰/۰.۴ کیلو ولت به دست مصرف کننده ها می رسد.



۳-۱- ارزیابی اولیه تلفات توان در شبکه توزیع واقعی

براساس داده‌های موجود، توان مصرفی کل در حدود 228459 (kW) می‌باشد که با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده با نرم افزار DigSILENT و انجام پخش بار، میزان تلفات توان حدود 7743 (kW) می‌باشد. جدول (۱)، فیدرهای با تلفات بیش از ۵ درصد در شبکه فشار متوسط را نشان می‌دهد. از این رو ضروری است به منظور کاهش تلفات این فیدرها، تدابیری اندیشیده شود.

جدول (۳): فیدر های با تلفات بیش از ۵ درصد

پست فوق توزیع	نام فیدر	توان ورودی فیدر (Kw)	طول فیدر (Km)	تلفات فیدر (Kw)	درصد تلفات فیدر
پست واقعی ۸	۸۵۳	۶۷۷۸	۴۹	۹۱۸	۱۳.۶
پست واقعی ۷	۶۴۱	۳۵۵۱	۲۳	۲۷۸	۷.۸
	۶۳۹	۳۲۵۴	۱۹	۱۹۴	۶.۰
	۹۱۳	۵۴۱۸	۲۸	۳۶۳	۶.۷
پست واقعی ۹	۹۲۳	۳۷۲۱	۳۴	۲۴۰	۶.۵

۳-۲- عدم قطعیت مبتنی بر سناریو

در این مقاله عدم قطعیت بار مطابق [۲۱] و عدم قطعیت منابع تولید پراکنده را همانند [۲۲] در نظر گرفته شده است و ۱۵ سناریو مانند جدول (۱) به وجود آمده است. از بین ۵ سناریو برتر در جایابی منابع تولید پراکنده، سناریویی که در حالت عدم قطعیت کمترین تلفات را دارا می‌باشد به عنوان سناریو برتر انتخاب می‌شود.

جدول (۴): اعداد و احتمالات موجود برای در نظر گیری عدم قطعیت در منابع تولید پراکنده و بار

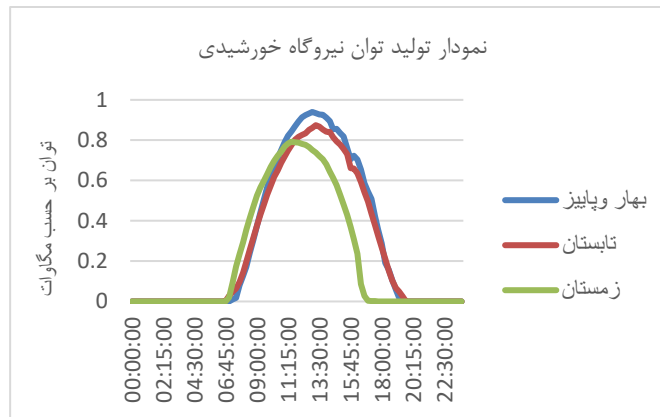
سناریو	درصد بار (نسبت به پیک بار)	احتمال بار (درصد)	مقدار تولید (مگاوات)	احتمال تولید (درصد)	احتمال کل (درصد)
۱	۹۵	۱۶	۰	۵۰.۳۷	۸.۰۶
۲	۹۵	۱۶	۰.۲۵	۱۱.۵۷	۱.۸۵
۳	۹۵	۱۶	۰.۵	۸.۴۷	۱.۳۶
۴	۹۵	۱۶	۰.۷۵	۱۳.۵۲	۲.۱۶
۵	۹۵	۱۶	۱	۱۵.۸۳	۲.۵۳
۶	۱۰۰	۶۸	۰	۵۰.۳۷	۳۴.۲۵
۷	۱۰۰	۶۸	۰.۲۵	۱۱.۵۷	۷.۸۷
۸	۱۰۰	۶۸	۰.۵	۸.۴۷	۵.۷۶
۹	۱۰۰	۶۸	۰.۷۵	۱۳.۵۲	۹.۱۹
۱۰	۱۰۰	۶۸	۱	۱۵.۸۳	۱۰.۷۶
۱۱	۱۰۵	۱۶	۰	۵۰.۳۷	۸.۰۶
۱۲	۱۰۵	۱۶	۰.۲۵	۱۱.۵۷	۱.۸۵
۱۳	۱۰۵	۱۶	۰.۵	۸.۴۷	۱.۳۶
۱۴	۱۰۵	۱۶	۰.۷۵	۱۳.۵۲	۲.۱۶
۱۵	۱۰۵	۱۶	۱	۱۵.۸۳	۲.۵۳

۳-۳- منحنی تولید روزانه نیروگاه خورشیدی

منحنی بار روزانه در نظر گرفته شده برای منبع تولید پراکنده این مقاله از روی تولید روزانه ثبت شده نیروگاه یک مگاواتی واقعی گرفته شده است. به منظور ساده سازی، به طور کاملاً اتفاقی یک روز نماینده برای فصل بهار و پاییز انتخاب شده و یک نماینده برای



تابستان و یک نماینده هم برای زمستان انتخاب شده و فرض شده این الگو برای روزهای دیگر هر فصل به همین شکل می‌باشد. شکل (۱) منحنی تولید روزانه نیروگاه خورشیدی در چهار فصل را نشان می‌دهد.



شکل (۱): منحنی تولید روزانه نیروگاه خورشیدی در چهار فصل

۳-۴- پیش بینی رشد بار

یکی دیگر از موارد مهم در انجام یک پروژه و ارزیابی آن پیش بینی رفتار آینده طرحی که مورد مطالعه قرار گرفته است، می‌باشد. توجه به این نکته از اهمیت به سزایی برخوردار است زیرا در صورت رعایت نکردن آن ممکن است طرح مورد نظر در سال‌های آینده با شکست مواجه شود و سرمایه انجام شده در آن از بین برود. برای در نظر گرفتن این نکته نیاز به پیش بینی رشد بار می‌باشد. در این مقاله از روش برازش منحنی برای پیش بینی بار استفاده شده است. با استفاده از نمونه‌های آماری منحنی‌هایی بدست می‌آید که این منحنی بهترین منحنی برازش داده شده به نمونه آماری می‌باشد. از دو پارامتر خطای استاندارد تخمین (S) و ضریب همبستگی (r) جهت یافتن بهترین منحنی استفاده می‌شود که در روابط (۱۸) تا (۲۲) آمده است [۲۳]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{x_{points}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}}} \quad (18)$$

که در آن y_i مقدار i ام نمونه آماری، n_{param} شماره پارامتر در مدل، n_{points} شماره نمونه آماری و $f(x_i)$ تابع مدل x_i ورودی آماری می‌باشند.

$$S_t = \sum_{i=1}^{x_{points}} (\bar{y} - y_i)^2 \quad (19)$$

$$y = \frac{1}{n_{points}} \sum_{i=1}^{x_{points}} y_i \quad (20)$$

که در آن $\bar{y}$ میانگین ورودی آماری می‌باشد.

$$S_r = \sum_{i=1}^{x_{points}} (y_i - f(x_i))^2 \quad (21)$$

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (22)$$

در بهترین حالت برازش $S=1$ و $r=1$ می‌باشد.



تابع $f(x_i)$ از چند گروه مدل منحنی های مشابه مانند *Linear Regression* و *Exponential Family* و *Sigmoidal* می باشند. جدول (۱) شماره ۱۰ معادله منحنی های S شکل (*Sigmoidal models*) که در پیش بینی بار استفاده گردیده است آورده شده است:

جدول (۵): مدل های مورد استفاده برای پیش بینی بار	
معادله	نام مدل
$y = (ae^{-b-cx})$	Gompertz Relation
$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$	Logistic
$y = (a - be^{-b-cx})$	Weibull
$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	MMF
$y = \frac{a}{(1 + e^{b-cx})^{\frac{1}{d}}}$	Richard

با توجه به داده های موجود از سال های گذشته و انجام محاسبات، پیش بینی بار برای کل شبکه واقعی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۶): پیش بینی بار مورد نیاز شبکه برای سال های آینده

توان مصرفی (وات)	توان مصرفی (وات)	توان مصرفی (وات)	توان مصرفی (وات)	توان مصرفی (وات)	توان مصرفی (وات)	تعرفه
سال ۱۳۹۶	سال ۱۳۹۸	سال ۱۴۰۰	سال ۱۴۰۲	سال ۱۴۰۴	سال ۱۴۰۶	
۸۱.۲۲۰.۱۷۰	۸۸.۴۵۹.۶۶۱	۹۱.۸۱۸.۰۷۹	۹۴.۰۵۰.۰۸۰	۹۵.۵۸۷.۳۷۷	۹۶.۵۸۴.۸۵۰	خانگی
۲۹.۷۷۲.۴۵۶	۳۱.۲۶۸.۰۲۶	۳۳.۱۳۳.۸۹۵	۳۴.۳۴۴.۰۲۴	۳۵.۱۱۴.۹۹۷	۳۵.۶۰۰.۷۸۹	عمومی
۳۹.۰۲۶.۶۳۹	۴۰.۳۴۷.۶۶۰	۴۲.۵۹۱.۲۰۰	۴۴.۴۳۷.۰۴۰	۴۵.۹۳۹.۹۵۳	۴۷.۱۵۳.۷۰۱	کشاورزی
۴۰.۷۲۳.۱۱۱	۴۱.۸۲۳.۸۳۹	۴۳.۶۱۷.۰۴۸	۴۵.۱۹۶.۶۸۹	۴۶.۵۷۹.۹۹۵	۴۷.۷۸۵.۳۱۴	صنعتی
۲۵.۳۵۰.۰۳۶	۲۶.۴۸۳.۹۵۷	۲۸.۳۹۹.۶۰۷	۲۹.۹۵۰.۸۳۷	۳۱.۱۸۸.۷۲۵	۳۲.۱۶۵.۶۱۱	تجاری
۷.۳۲۷.۲۷۵	۷.۴۶۳.۲۳۹	۷.۸۷۹.۰۴۸	۸.۲۰۲.۶۹۴	۸.۴۵۱.۵۶۵	۸.۶۴۱.۲۱۸	روشنایی
۲۲۳.۴۱۹.۶۸۶	۲۳۵.۸۴۶.۳۸۲	۲۴۷.۴۳۸.۸۷۸	۲۵۶.۲۱۱.۳۳۳	۲۶۲.۸۶۲.۶۱۱	۲۶۷.۹۳۱.۴۸۴	جمع توان مصرفی

با توجه به انجام محاسبات مختلف در طرح شبکه واقعی، ضریب رشد برای هر سال را می توان بین ۱.۵ تا ۲ درصد در نظر گرفت. از آن جایی که فیدر های مورد مطالعه بیشتر در حاشیه شهرستان می باشند، در این مقاله نرخ رشد بار را برای فیدر های مورد مطالعه ۱.۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۳-۵- انجام مطالعات اولیه بر روی شبکه

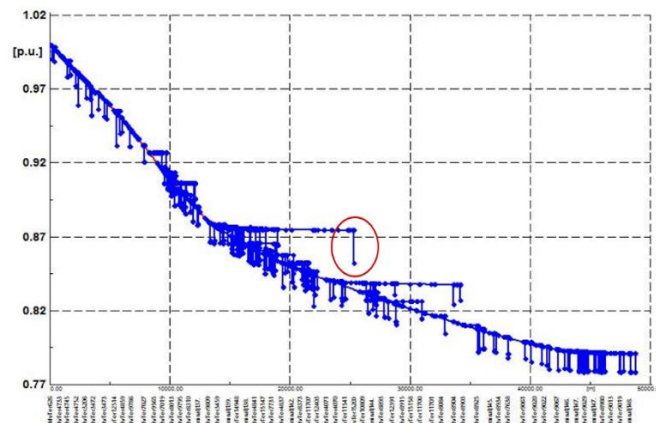
در این بخش به انجام مطالعات اولیه روی فیدرهای مورد مطالعه شامل انرژی مصرفی فیدر، تلفات انرژی فیدر در طول دوره ۲۰ ساله پرداخته شده است. در این قسمت فرض بر این است که فیدرهای موجود در طول دوره ۲۰ ساله، هیچ گونه اصلاحاتی روی آن ها انجام نخواهد شد و همچنین هیچ گونه تجهیزاتی برای کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ در فیدر قرار نخواهد گرفت.



همچنین نمودار پروفیل ولتاژ در زمان پیک بار در نظر گرفته شده است.

الف- فیدر ۸۵۳

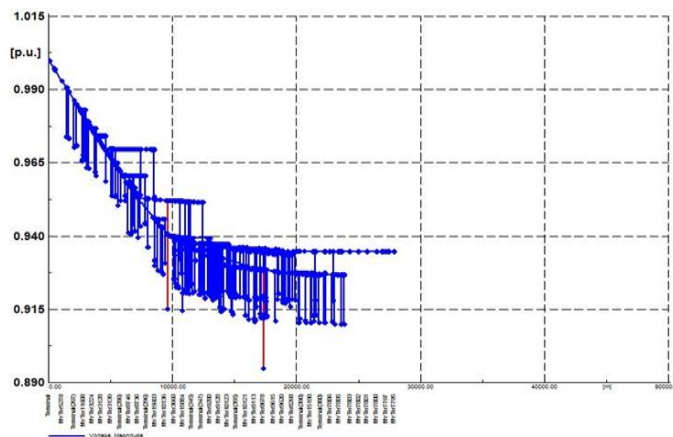
این فیدر دارای بیشترین تلفات و افت ولتاژ می‌باشد. اصلاح و تجهیز این فیدر بسیار واجب می‌باشد. به دلیل اینکه در انتهای فیدر مشکلات افت ولتاژ بسیاری وجود دارد و ممکن است وسایل برقی مصرف کنندگان در انتهای فیدر بابت این مشکل دچار آسیب شوند. تلفات این فیدر حدود ۱۳ درصد می‌باشد شکل (۲) پروفیل ولتاژ در پیک بار را نشان می‌دهد. قسمتی که با دایره خط کشیده شده، قسمت بالای نقطه ولتاژ سمت ۲۰ کیلو ولت می‌باشد و قسمت پایین نقطه، ولتاژ سمت ۳۸۰ ولت می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود افت ولتاژ زیادی در این فیدر وجود دارد که باید جبران شود.



شکل (۲): پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در بار پیک

ب- فیدر ۹۱۳

نمایی از پروفیل ولتاژ فیدر ۹۱۳ در شکل (۳) نشان داده شده است. پروفیل ولتاژ فیدر ۹۱۳ در لحظه پیک بار که از حد مجاز خود پایین آمده است.

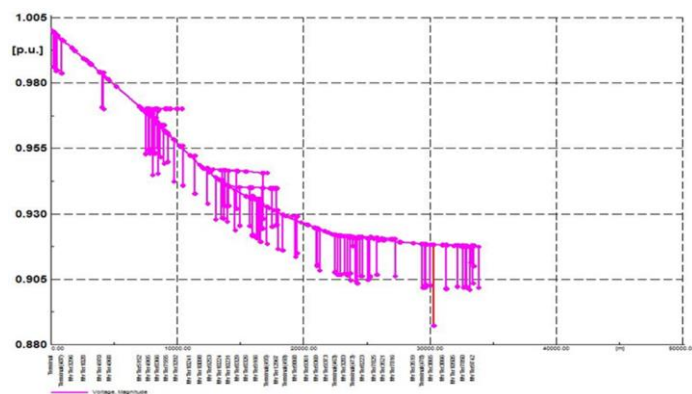


شکل (۳): پروفیل ولتاژ فیدر ۹۱۳ در بار پیک

پ- فیدر ۹۲۳

نمایی از پروفیل ولتاژ فیدر ۹۲۳ در شکل (۴) نشان داده شده است. پروفیل ولتاژ فیدر ۹۲۳ در لحظه پیک بار که از حد مجاز خود پایین آمده است.

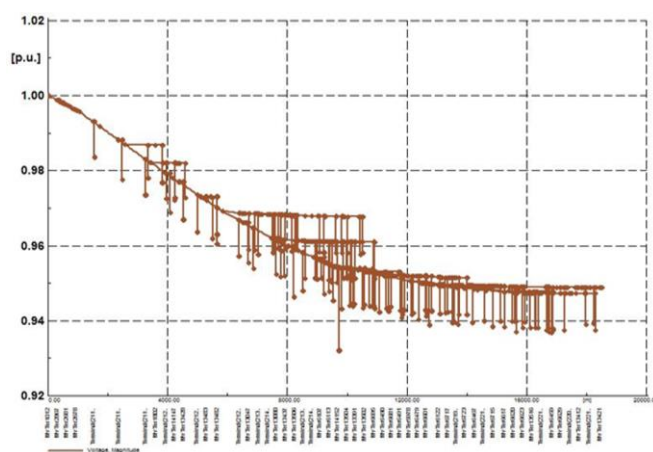




شکل (۴): پروفیل ولتاژ فیدر ۹۲۳ در بار پیک

ت- فیدر ۶۳۹

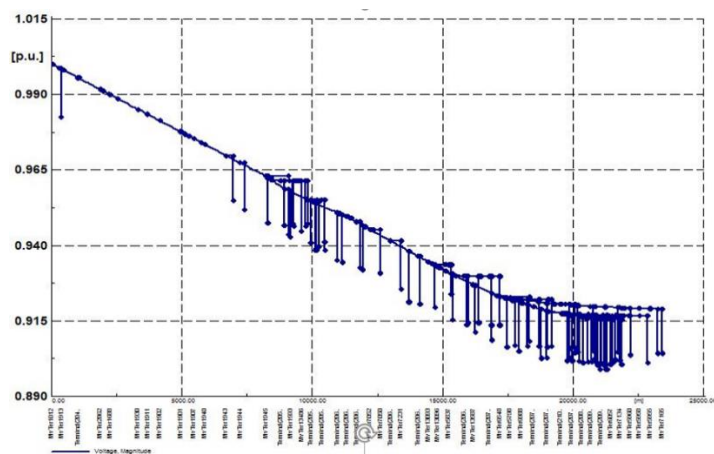
نمایی از پروفیل ولتاژ فیدر ۶۳۹ در شکل (۵) نشان داده شده است. پروفیل ولتاژ فیدر ۶۳۹ در لحظه پیک بار که از حد مجاز خود پایین آمده است.



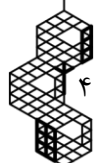
شکل (۵): پروفیل ولتاژ فیدر ۶۳۹ در بار پیک

ث- فیدر ۶۴۱

نمایی از پروفیل ولتاژ فیدر ۶۴۱ در شکل (۶) نشان داده شده است. پروفیل ولتاژ فیدر ۶۴۱ در لحظه پیک بار که از حد مجاز خود پایین آمده است.



شکل (۶): پروفیل ولتاژ فیدر ۶۴۱ در بار پیک



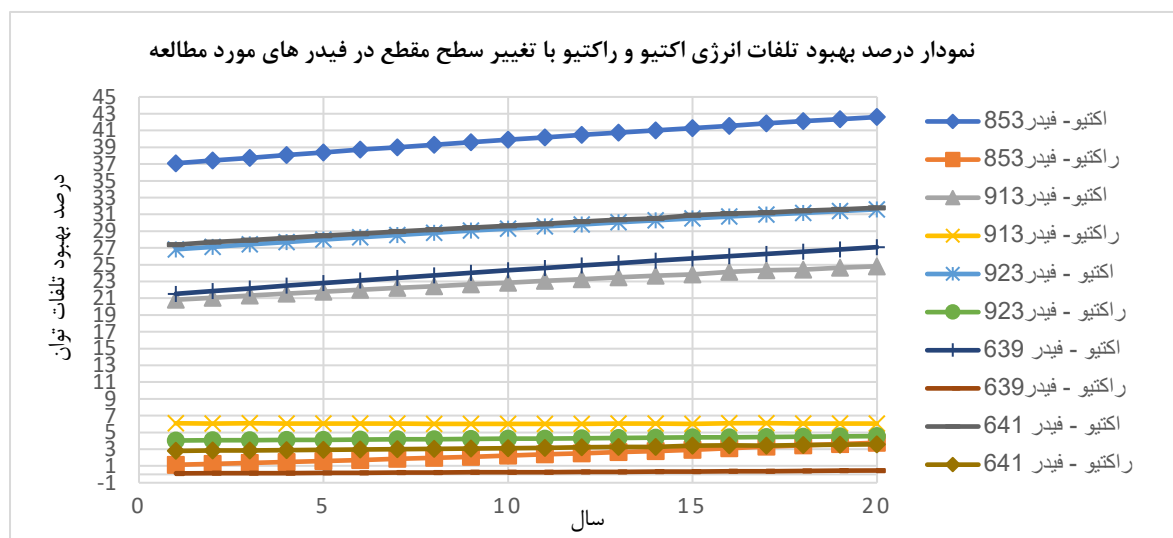


۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی تغییر سطح مقطع، خازن گذاری، ادوات FACTS، نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو و نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو آورده شده است. همچنین نتایج اقتصادی حاصل از جابجایی منابع ذکر شده آورده شده است. در این پروژه قیمت انرژی راکتیو برابر ۱۲۰۰ تومان و توان راکتیو ۱۰۰ تومان به ازای هر کیلووات ساعت و هر کیلو وات ساعت به ترتیب، در نظر گرفته شده است [۲۳].

۴-۱- نتایج شبیه سازی تغییر سطح مقطع کابل

در ابتدا کابل های Fox، Mink و Hyena مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه با جابجایی کابل های موجود و اضافه کردن کابل Wolf به جابجایی کابل در فیدر پرداخته شده است. لازم به ذکر است که کابل با سطح مقطع بزرگ تر از Wolf به دلیل وزن بالا و عدم تحمل تیرهای برق، نمی توان استفاده کرد. شکل (۷) درصد بهبود تلفات انرژی راکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر در نظر گرفته شده را نشان می دهد. تحلیل اقتصادی این روش در جدول (۷) نشان داده شده است.

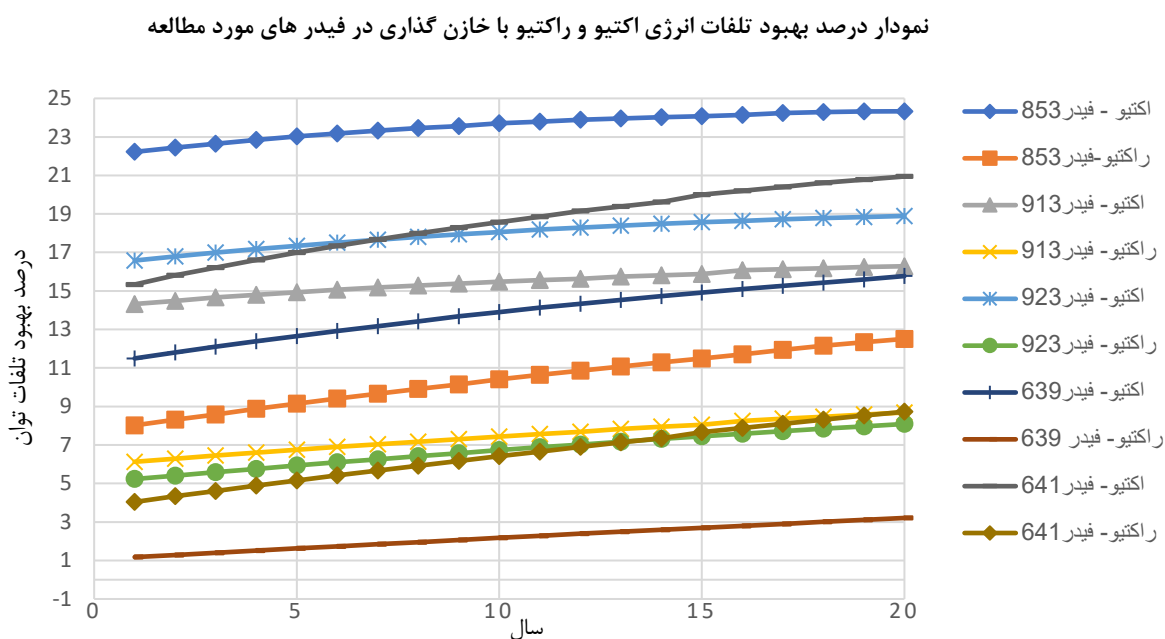


شکل (۷): درصد بهبود تلفات انرژی راکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر

۴-۲- نتایج شبیه سازی خازن گذاری

با توجه به فهرست بهای کالای شهرستان مورد مطالعه، خازن های فشار متوسط موجود با توان ۱۰۰ کیلوواری و ۲۰۰ کیلوواری موجود می باشد و جابجایی با این دو خازن ها انجام شده است. در فیدر ۸۵۳، ۹۱۳، ۹۲۳، ۶۳۹ و ۶۴۱ به ترتیب ۱۰، ۸، ۷، ۷ و ۸ خازن ۲۰۰ کیلو واری استفاده شده است. شکل (۸) درصد بهبود تلفات انرژی راکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر در نظر گرفته شده را نشان می دهد. تحلیل اقتصادی این روش در جدول (۸) نشان داده شده است.

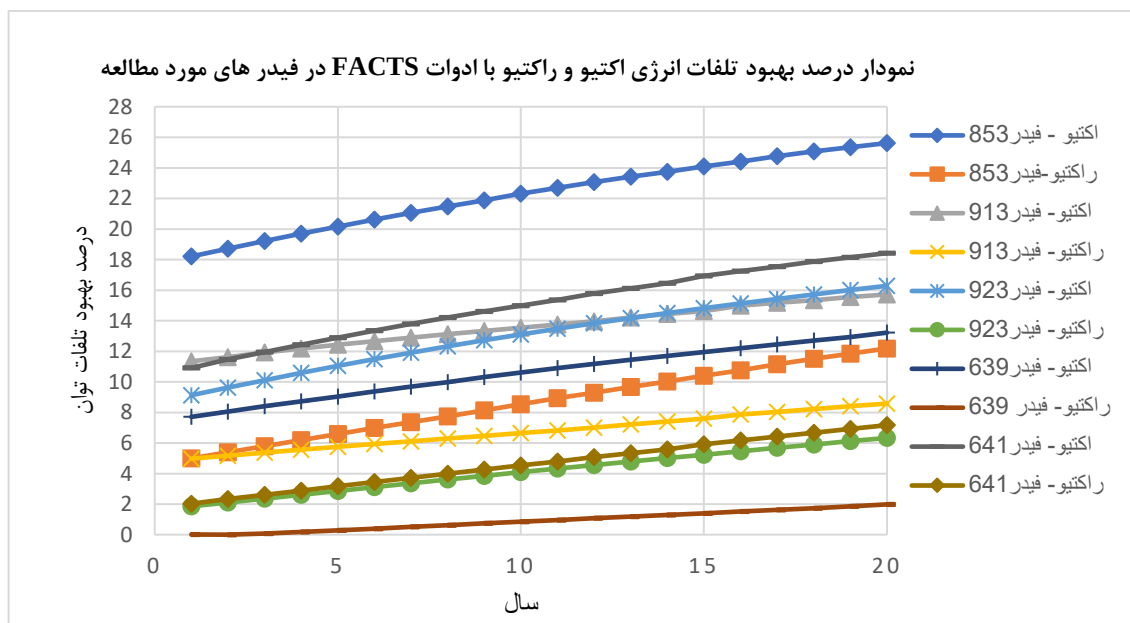




شکل (۸): درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر

۴-۳- نتایج شبیه سازی ادوات FACTS

ظرفیت D-Statcom مورد استفاده در جایابی ۱ مگاوار می باشد و تنظیمات کنترل کننده آن به نحوی است که ولتاژ بر روی ۱ پریونیت بماند. شکل (۹) درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر در نظر گرفته شده را نشان می دهد. تحلیل اقتصادی این روش در جدول (۷) نشان داده شده است.

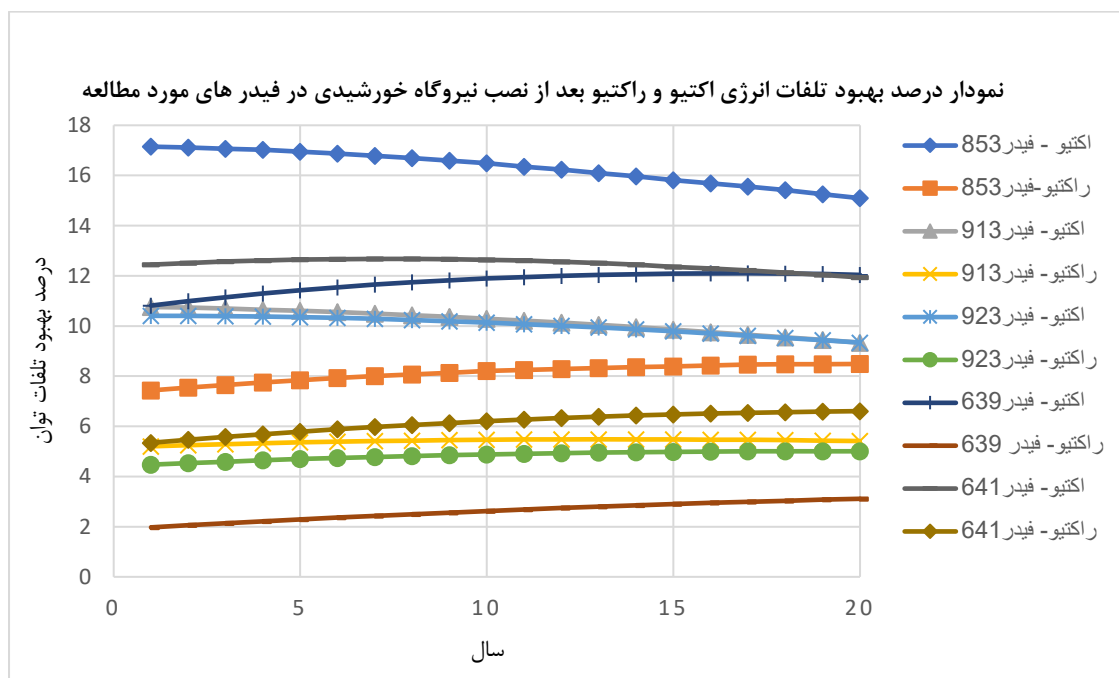


شکل (۹): درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر



۴-۴- نتایج شبیه سازی نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو

در این قسمت فرض بر این است که نیروگاه‌های خورشیدی با ضریب توان یک (نیروگاهی که در عمل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند)، در ۳۳ درصد ابتدای فیدر می‌توانند قرار بگیرند (به دلیل عدم تغییرات ولتاژ در شب و روز و عدم به هم ریختن تنظیمات تب ترانسفورماتور ها). اما با توجه به ایده مطرح شده مبنی بر استفاده از اینورتر نیروگاه خورشیدی به عنوان یک D-Statcom، آن را در سراسر طول فیدر جایی کرده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین تمامی تحلیل‌های اقتصادی انجام شده از دید شرکت توزیع و سرمایه‌گذار خصوصی مورد بررسی قرار گرفته شده است. به این ترتیب که اگر شرکت توزیع بخواهد سرمایه‌گذاری کند، تحلیل اقتصادی برای آن انجام شده است. در صورتی که سرمایه‌گذار خصوصی بخواهد سرمایه‌گذاری را انجام دهد یک تحلیل اقتصادی برای سرمایه‌گذار خصوصی انجام می‌شود و یک تحلیل اقتصادی برای شرکت توزیع که سود حاصل از نیروگاه خورشیدی برای شرکت توزیع در این حالت می‌تواند کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ باشد. شکل (۱۰) درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال قابل مشاهده می‌باشد. تحلیل اقتصادی این روش در جدول (۷) نشان داده شده است.

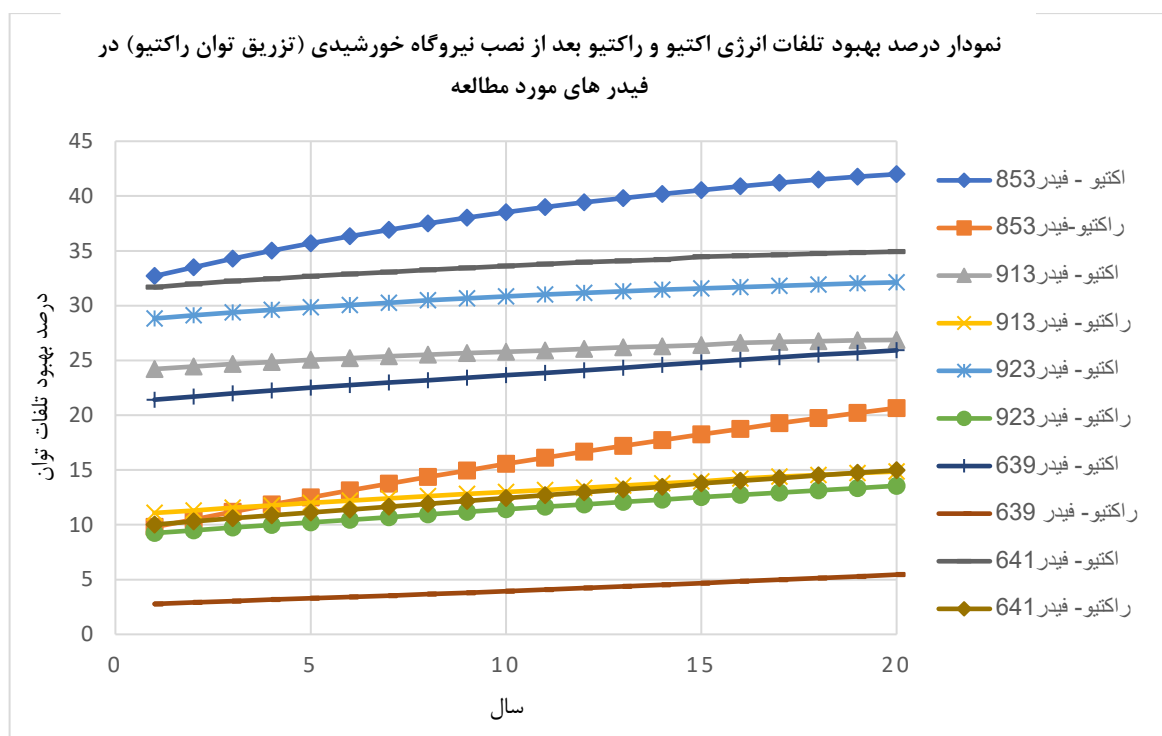


شکل (۱۰): درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر

۴-۵- نتایج شبیه سازی نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو

شکل (۱۱) درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال قابل مشاهده است. تحلیل اقتصادی این روش در جدول (۷) نشان داده شده است.

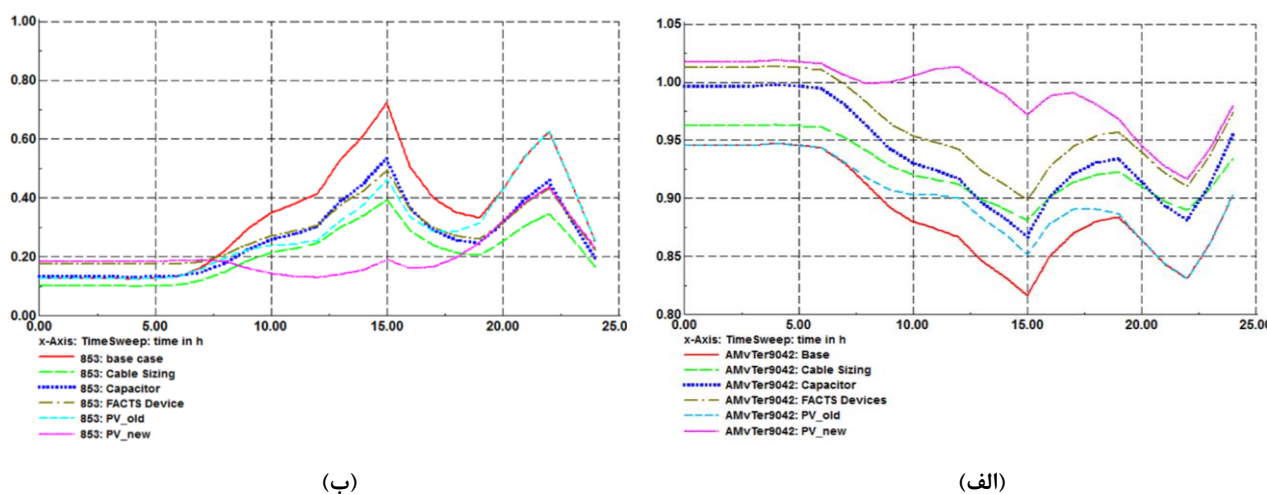




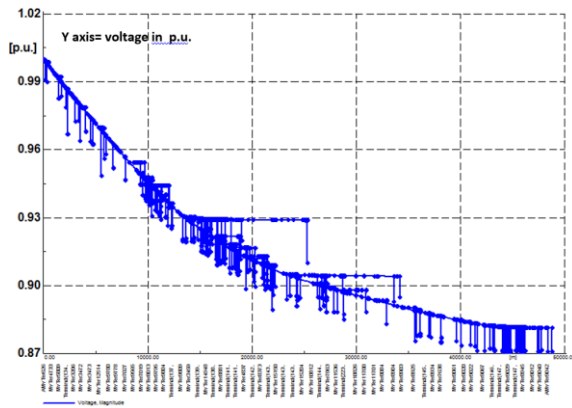
شکل (۱۱): درصد بهبود تلفات انرژی اکتیو و راکتیو طی ۲۰ سال در پنج فیدر

۶-۴- تاثیر تمام روش‌ها بر روی ولتاژ شبکه و بهبود تلفات توان

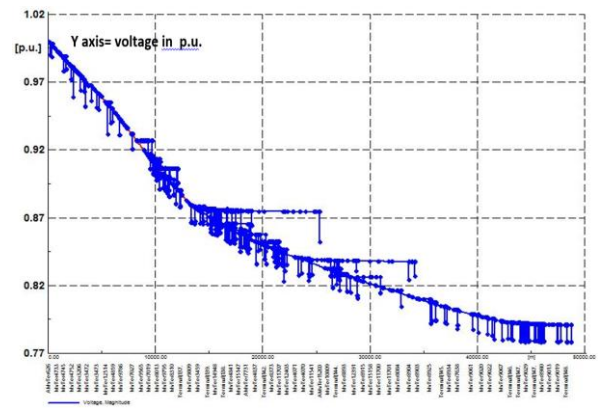
شکل (۱۲) اعمال روش‌های مختلف بر روی ولتاژ و همچنین مقایسه روش‌های به کار گرفته شده در بهبود تلفات توان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که بهترین روش برای بهبود ولتاژ در شبکه، استفاده از نیروگاه خورشیدی (با تزریق توان راکتیو) (PV_new) و بدترین روش، نیروگاه خورشیدی (بدون تزریق توان راکتیو) (PV_old) می‌باشد. که باید هم به این صورت باشد که ولتاژ را تغییر ندهد و باعث به هم ریختن تب چنجر ترانسفورماتور ها نشود. ولی استفاده از نیروگاه خورشیدی (با تزریق توان راکتیو) مشکل به هم ریختن تب چنجرهای ترانسفورماتور را ندارد. روش‌های دیگر هم نسبت به حالت پایه فیدر توانسته‌اند تا حد مطلوبی ولتاژ را بهبود دهند. همچنین می‌توان دریافت که بهترین روش برای کاهش تلفات توان نیروگاه خورشیدی (با تزریق توان راکتیو) (PV_new) و بدترین روش برای کاهش تلفات، نیروگاه خورشیدی (بدون تزریق توان راکتیو) (PV_old) می‌باشد.



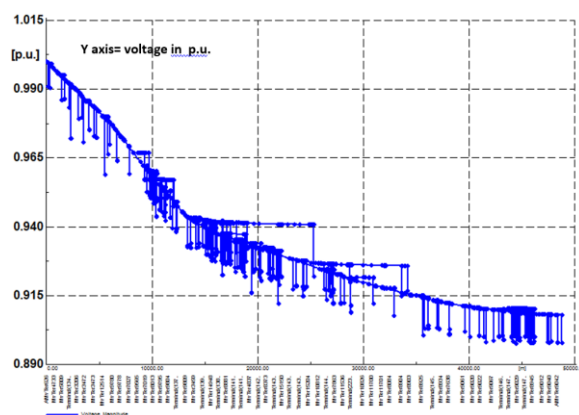
شکل (۱۲): اعمال روش‌های مختلف بر روی ولتاژ (الف) و مقایسه روش‌های به کار گرفته شده در بهبود تلفات توان (ب)



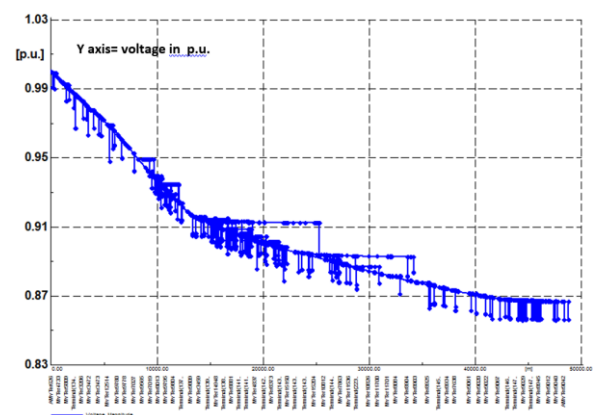
پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و در حالت تغییر سطح مقطع



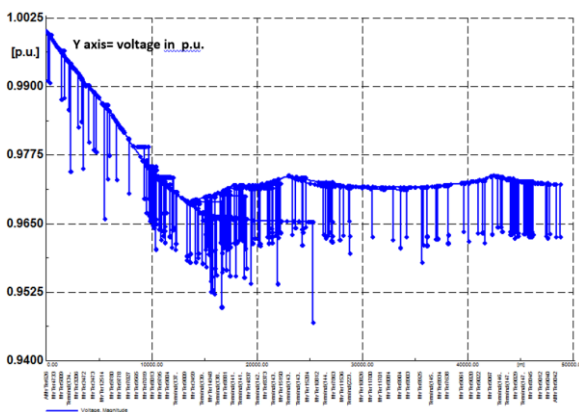
پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار



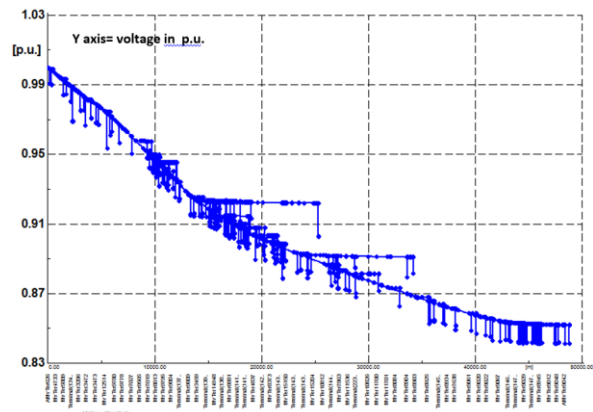
پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و در حضور ادوات FACTS



پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و در حالت خازن گذاری



پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و در حضور نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو



پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و در حضور نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو

شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در پیک بار و اعمال روش های مختلف

۴-۷- تاثیر تمام روش ها بر پروفیل ولتاژ فیدر

در این بخش پروفیل ولتاژ یکی از ۵ فیدر مورد مطالعه (فیدر ۸۵۳) با توجه به روش های به کار گرفته شده مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته شده است. با توجه به شکل (۱۳)، پروفیل ولتاژ فیدر ۸۵۳ در حضور نیروگاه خورشیدی همراه با تزریق توان راکتیو بهترین عملکرد را از خود به جای گذاشته و ولتاژ همه نقاط در پیک تابستان بالای ۰.۹۵ پرینیت می باشد. بدترین عملکرد نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو می باشد که با وجود هزینه های سرمایه گذاری تقریباً برابر، هیچ کمکی به بهبود ولتاژ فیدر



نکرده است. در ادامه حضور ادوات FACTS بیشترین تاثیر را در پروفیل ولتاژ داشته است. سپس به ترتیب خازن گذاری، تغییر سطح مقطع و در آخر هم نیروگاه خورشیدی بدون تزریق توان راکتیو می باشد.

۸-۴- پراکندگی تجهیزات جایابی شده بر روی نقشه

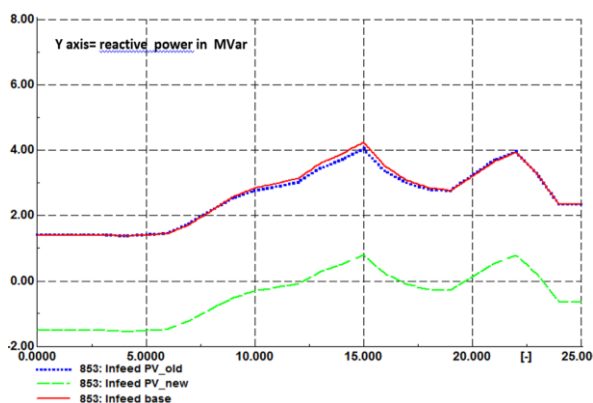
شکل (۱۴) پراکندگی تجهیزات جایابی شده بر روی نقشه فیدر ۸۵۳ را نشان می دهد.



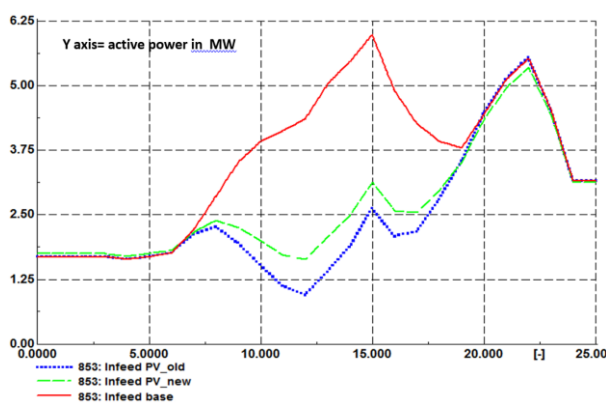
شکل (۱۴): پراکندگی تجهیزات جایابی شده در فیدر ۸۵۳

۹-۴- مقایسه طرح موجود نیروگاه خورشیدی با طرح پیشنهاد شده نیروگاه خورشیدی

با توجه به شکل (۱۵)، در حالت نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو (PV_new) از ۳ نیروگاه خورشیدی ۱ مگاواتی استفاده شده است. در حالی که نیروگاه تزریق توان بدون توان راکتیو (PV_old)، ۴ نیروگاه ۱ مگاواتی استفاده شده است. نکته قابل توجه در شکل های ارائه شده، کمک نیروگاه های خورشیدی در کاهش پیک تابستان در طول روز می باشد که توان اکتیو ورودی پست پیک بار نسبت به حالت اولیه به شدت کاهش داشته است و این امر باعث از بین رفتن خاموشی های برنامه ریزی شده در این فیدر می باشد.



(ب)



(الف)

شکل (۱۵): مقایسه روش های به کار گرفته شده در کاهش توان اکتیو (الف) و راکتیو (ب) ورودی پست

تحلیل اقتصادی و فنی تمامی فیدرهایی که مورد بررسی قرار گرفته است به همراه میانگین کاهش تلفات در فیدر و همچنین میزان بهبود ولتاژ در آن فیدر در جدول (۷) نشان داده شده است.



جدول (۷): نگاه کلی به تحلیل فنی و اقتصادی روش های به کار گرفته شده

روش	فیدر	هزینه اولیه (میلیارد تومان)	NPV (میلیارد تومان)	زمان بازگشت سرمایه (سال)	ROR سرمایه (درصد)	میانگین کاهش تلفات	درصد بهبود ولتاژ
تغییر سطح مقطع	۸۵۳	۹.۶	۲.۵۷	۱۳	۱۳.۳	۴۰	
	۹۱۳	۹.۳	-۴.۶	-	-	۲۵	
	۹۲۳	۴.۸	-۱.۶	-	-	۳۰	۴۰
	۶۳۹	۰.۸	-۱.۳	۴.۵	۲۹	۲۵	
	۶۴۱	۳.۴	۰	-	-	۳۰	
خازن گذاری	۸۵۳	۰.۳	۲۰.۱	۱	۷۵۴	۲۴	
	۹۱۳	۰.۲۴	۱۲.۵	۱	۶۰.۵	۱۵	
	۹۲۳	۰.۲۱	۱۱.۳	۱	۶۳۰	۱۸	۳۵
	۶۳۹	۰.۲۱	۱۰.۴	۱	۵۸۲	۱۴	
	۶۴۱	۰.۲۴	۱۲.۳	۱	۶۰۰	۱۸	
ادوات FACTS	۸۵۳	۱.۸	۲۴.۸	۱	۱۶۰	۲۲	
	۹۱۳	۱.۲	۱۳.۶	۱	۱۳۹	۱۵	
	۹۲۳	۱.۲	۱۲.۷	۱	۱۳۰	۱۴	۵۰
	۶۳۹	۱.۲	۱۲.۵	۱	۱۳۰	۱۱	
	۶۴۱	۱.۲	۱۲.۵	۱	۱۲۷	۱۵	
نیروگاه خورشیدی (ردیف اول و دوم برای هر فیدر به ترتیب شرکت توزیع و بخش خصوصی می باشد)	۸۵۳	۴۰	۳۸.۳	۵.۵	۲۳	۱۷	
		۴۰	۲۶.۵	۷	۲۰		
	۹۱۳	۳۰	۲۶.۳	۵	۲۲	۱۱	
		۳۰	۱۹.۸	۶	۲۰		
	۹۲۳	۳۰	۲۵.۷	۵	۲۲	۱۱	۱۰
		۳۰	۱۹.۸	۶	۲۱		
	۶۳۹	۳۰	۲۵.۱	۵	۲۲	۱۲	
		۳۰	۱۹.۸	۶	۲۰		
		۳۰	۲۶.۱	۵	۲۱		
	۶۴۱	۳۰	۱۹.۸	۶	۲۰	۱۳	
نیروگاه خورشیدی (تزریق توان راکتیو)	۸۵۳	۳۰	۵۸.۶	۳	۳۴	۴۰	۱۰۰
(ردیف اول و دوم)	۹۱۳	۲۰	۳۴.۳	۳	۳۲	۲۷	



روش	فیدر	هزینه اولیه (میلیارد تومان)	NPV (میلیارد تومان)	زمان بازگشت سرمایه (سال)	ROR سرمایه (درصد)	میانگین کاهش تلفات	درصد بهبود ولتاژ
برای هر فیدر به		۲۰	۲۷.۷	۴	۲۹		
ترتیب شرکت		۲۰	۳۲.۶	۳	۳۱		
توزیع و بخش	۹۲۳	۲۰	۲۶.۳	۴	۲۹	۳۲	
خصوصی می باشد)		۲۰	۳۲.۳	۳	۳۲		
	۶۳۹	۲۰	۲۷.۴	۴	۳۰	۲۵	
		۲۰	۳۲.۵	۳	۳۲		
	۶۴۱	۲۰	۲۶.۱	۴	۲۹	۳۵	

با توجه به جدول (۶)، جایابی نیروگاه خورشیدی (با تزریق توان راکتیو) از لحاظ فنی، بهترین کارایی را بین روش‌های موجود دارد و خازن گذاری از لحاظ اقتصادی بیشترین بازدهی را دارا می‌باشد. حال با توجه به نتایج به دست آمده بهترین حالت برای شبکه را می‌توان نیروگاه خورشیدی (با تزریق توان راکتیو) در نظر گرفت. تغییر سطح مقطع، از لحاظ فنی نتایج نسبتاً خوبی دارد ولی از لحاظ اقتصادی بازگشت سرمایه آن طولانی مدت است و در مواردی هم بازگشت سرمایه ندارد. با توجه به مقایسه نتایج خازن گذاری و ادوات FACTS، از لحاظ فنی نزدیک به هم هستند و از لحاظ اقتصادی هم مانند هم می‌باشند. به دلیل پیچیدگی در تعمیر و نگهداری ادوات FACTS می‌توان از این روش استفاده نکرد و همان خازن گذاری در شبکه را ترجیح داد. شاید به همین دلیل استفاده از ادوات FACTS در شبکه توزیع رایج نشده و مورد استقبال قرار نگرفته است و در سطح انتقال از آن استفاده می‌شود. در مورد نیروگاه خورشیدی (بدون تزریق توان راکتیو) می‌توان گفت که از لحاظ فنی تاثیری به طور کلی ندارد. و از لحاظ اقتصادی هم با توجه به افزایش قیمت سرمایه اولیه، بازگشت سرمایه آن دیرتر شده است. اما در صورت به کارگیری ایده مطرح شده در نیروگاه خورشیدی هم از لحاظ فنی شاهد بهبود در تلفات توان و پروفیل ولتاژ خواهد بود و هم از لحاظ اقتصادی بازگشت سرمایه ۳ الی ۴ ساله دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روش‌های مختلف برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه توزیع مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها شامل تغییر سطح مقطع کابل، خازن گذاری، استفاده از ادوات FACTS و جایابی نیروگاه‌های خورشیدی با و بدون تزریق توان راکتیو است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در کنار تحلیل‌های اقتصادی و فنی برای هر روش ارائه شده است، تا بتوان کارایی و هزینه-اثربخشی هر یک از روش‌ها را ارزیابی کرد. برای اطمینان از کارایی این طرح‌ها در بلندمدت، پیش‌بینی رشد بار برای ۲۰ سال آینده نیز مدنظر قرار گرفته تا مشخص شود آیا طرح‌های موجود در آینده نیز پاسخگو خواهند بود. علاوه بر این، عدم قطعیت بار و تولید توان در منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده و برای یافتن بهترین محل جایابی منابع، تمام حالت‌های ممکن بررسی شده است. این رویکرد تضمین می‌کند که نتایج به دست آمده، دقیق و قابل اطمینان است و برای شرایط عدم قطعیت، بهترین گزینه‌ها مشخص شده‌اند. یک ایده مهم در این تحقیق استفاده از اینورترهای نیروگاه خورشیدی به عنوان ادوات FACTS است، که امکان تزریق توان راکتیو به شبکه را فراهم می‌آورد. این روش از لحاظ فنی توانسته است ولتاژ را بهبود بخشد و از نظر اقتصادی نیز بازگشت سرمایه سریع‌تری را فراهم کند. بر اساس نتایج، استفاده از نیروگاه خورشیدی با تزریق توان راکتیو (PV_new) از نظر فنی بهترین عملکرد را در بهبود ولتاژ و کاهش تلفات دارد و خازن گذاری نیز از لحاظ اقتصادی به صرفه‌ترین گزینه محسوب می‌شود. در نهایت، اطلاعات فنی و اقتصادی به‌طور جامع مقایسه شده‌اند تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند انتخاب بهتری از میان طرح‌ها داشته باشند. این تحقیق به تصمیم‌گیرندگان این



امکان را می‌دهد که با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی، بهینه‌ترین طرح را برای بهبود شبکه توزیع انتخاب کنند و به بهره‌وری و پایداری شبکه در بلندمدت کمک کنند.

مراجع

- [1] S. Nikkhah and A. Rabiee, "Multi-objective stochastic model for joint optimal allocation of DG units and network reconfiguration from DG owner's and DisCo's perspectives," *Renewable energy*, vol. 132, pp. 471-485, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.032.
- [2] H. Zhai, M. Yang, B. Chen, and N. Kang, "Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 1-10, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.12.027.
- [3] J. Shukla, B. Das, and V. Pant, "Stability constrained optimal distribution system reconfiguration considering uncertainties in correlated loads and distributed generations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 121-133, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.010.
- [4] I. B. Hamida, S. B. Salah, F. Msahli, and M. F. Mimouni, "Optimal network reconfiguration and renewable DG integration considering time sequence variation in load and DGs," *Renewable energy*, vol. 121, pp. 66-80, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.12.106.
- [5] J. Wen, Y. Tan, L. Jiang, and K. Lei, "Dynamic reconfiguration of distribution networks considering the real-time topology variation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 7, pp. 1509-1517, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1304.
- [6] Y. Lin and Z. Bie, "Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1266-1279, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.059.
- [7] S. Lei, Y. Hou, F. Qiu, and J. Yan, "Identification of critical switches for integrating renewable distributed generation by dynamic network reconfiguration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 420-432, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2738014.
- [8] L. Bai, T. Jiang, F. Li, H. Chen, and X. Li, "Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1082-1091, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.004.
- [9] A. Azizivahed, H. Narimani, M. Fathi, E. Naderi, H. R. Safarpour, and M. R. Narimani, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems," *Energy*, vol. 147, pp. 896-914, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.111.
- [10] M. J. Afzal, S. Ahmad, M. A. Arshad, and S. A. A. Kazmi, "Voltage improvement of loop configured distribution networks with DGs & FACTS devices," in *2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 2018: IEEE, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPESG.2018.8384503.
- [11] N. V. Kovački, P. M. Vidović, and A. T. Sarić, "Scalable algorithm for the dynamic reconfiguration of the distribution network using the Lagrange relaxation approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 94, pp. 188-202, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.07.005.
- [12] M. R. Kaveh, R.-A. Hooshmand, and S. M. Madani, "Simultaneous optimization of re-phasing, reconfiguration and DG placement in distribution networks using BF-SD algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 62, pp. 1044-1055, 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2017.09.041.
- [13] J. P. Mahato, Y. K. Poudel, R. K. Mandal, and M. R. Chapagain, "Power loss minimization and voltage profile improvement of radial distribution network through the installation of capacitor and distributed generation (DG)," *Archives of Advanced Engineering Science*, pp. 1-9, 2024, doi: 10.47852/bonviewAAES42022031.
- [14] S. Kumar, C. Kumar, M. S. Shaikh, A. A. Sahito, and Z. A. Arain, "Power Loss Reduction and Voltage Improvement Through Capacitors and Their Optimization for the Distribution System," in *The Internet of Energy*: Apple Academic Press, 2024, pp. 267-294.
- [15] H. T. Trinh and T. T. Nguyen, "Optimal placement of distributed generations on distribution network for reducing power loss and improving feeder balance," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 22, no. 2, pp. 471-479, 2024, doi: 10.12928/telkomnika.v22i2.25683.



- [16] S. A. Adegoke, Y. Sun, A. S. Adegoke, and D. Ojeniyi, "OPTIMAL PLACEMENT OF DG TO MINIMIZE POWER LOSS AND VOLTAGE STABILITY IMPROVEMENT," *Heliyon*, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39298.
- [17] A. Shaheen, R. El-Seheimy, S. Kamel, and A. Selim, "Reliability enhancement and power loss reduction in medium voltage distribution feeders using modified jellyfish optimization," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 75, pp. 363-381, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.05.084.
- [18] S. L. Chavan, "Distribution Feeder Loss Optimization: A Case Study," *International Journal of Automation and Smart Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 2451-2451, 2023, doi: 10.5875/ausmt.v13i1.2451.
- [19] A. O. Salau, Y. W. Gebru, and D. Bitew, "Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04233.
- [20] P. S. Method, "Problem Solving Method," *User Manual Technical References*, 2015.
- [21] S. M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Voltage stability constrained multi-objective optimal reactive power dispatch under load and wind power uncertainties: A stochastic approach," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 598-609, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.021.
- [22] M. Aien, A. Biglari, and M. Rashidinejad, "Probabilistic reliability evaluation of hybrid wind-photovoltaic power systems," in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2013: IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599825.
- [23] B. Idlbi, J. von Appen, T. Kneiske, and M. Braun, "Cost-benefit analysis of battery storage system for voltage compliance in distribution grids with high distributed generation," *Energy Procedia*, vol. 99, pp. 215-228, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.112.

زیر نویس ها

¹Tabu Search (TS)

²Present Worth

³Future Worth

⁴Rate of Return

⁵Minimum Attractive Rate of Return

⁶Load Forecasting

